

f. 動物プランクトンの群集構造（資源生態部 佐藤智希）

【目的】

厚田および昆布森沿岸域におけるサケ幼稚魚沿岸滞泳期の餌料環境の年および季節変動を把握するために、2006～2020年にNORPAC ネット（北太平洋標準ネット、目合：330 μm ）によって採集された動物プランクトン試料を用いて群集構造解析を実施した。

【方法】

動物プランクトン試料は、計数する総個体数が500個体となるように、適宜プランクトン分割器を用いて分割して可能な限り下位の分類群まで同定し、それぞれの分類群ごとに計数した。それぞれの分類群の個体数データから、採集時に得られた濾水計の値より算出された濾水量をもとに1 m^3 あたりの個体数密度を算出した。

各地域における群集構造の分析方法は加賀ら（2016）を参考にした。分析対象種は、調査期間中の出現頻度が5%以上の種類とした。個体数密度のデータは、分散の影響を軽減させるために $\log(x+1)$ で対数変換し、*morisita-horn* の類似度指数に基づき非軽量多次元尺度法（Nonmetric multidimensional scaling; NMDS）により序列化した。序列化された各データは、*k-mean* 法によりクラスター分けを行い、最適なクラスター数は *Caliński criterion*（*Caliński and Harabasz*, 1974）の値を用いて決定した。また、それぞれのクラスターの指標となる種類を推定するために、指標種分析（*INSPAN*; *Dufréne and Legendre*, 1997）を実施した。

【結果及び考察】

厚田沿岸域における動物プランクトンの個体数密度は、年によりその傾向は異なるが、 $5 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$ 以下で変動し、4月から5月にかけて減少する傾向を示した（図1）。一方で昆布森沿岸域における動物プランクトン個体数密度は、年によって季節変動の傾向が異なっていた（図2）。両地域において、様々な動物プランクトン分類群が出現した。多くの場合、体長2 mm以下のカラヌス目カイアシ類が各年の調査期間を通じて優占していたが、昆布森沿岸域においては2016年以降、7月になると枝角類が優占するようになっていた。

動物プランクトン群集構造解析の結果、厚田沿岸では、1) ベントス浮遊幼生を主体とするグループ、2) 冷水性カイアシ類を主体とするグループ、3) オキアミ類幼生、クラゲ類を主体とするグループの3つのグループに分けられた（表1）。一方、昆布森沿岸では、1) 枝角類、暖水性カイアシ類を主体とするグループ、2) 冷水性カイアシ類を主体とする2つのグループに分けられた（表2）。

両地域の群集構造は、一般的に季節の経過とともに冷水性の種類を主体とするグループから暖水性を主体とするグループへと変化していた（図3）。厚田沿岸域では、3月下旬から5月上旬は、冷水性カイアシ類を主体とするグループ、あるいはオキアミ類幼生、クラゲ類を主体とするグループが優占し、5月中旬以降、ベントス浮遊幼生を主体とするグループへ群集構造が変化する傾向がみられるが、その季節変動は年によって違いがみられるものの、著しい年変動はみられなかった。一方で、昆布森沿岸域においては、2015年以前では沖側の定点では、枝角類、暖水性カイアシ類を主体とするグループがほとんどみられていなかったが、2015年以降、それらのグループが6月の早い時期からみられる傾向になった。冷水性の動物プランクトンは、一般的にサイズが大きく栄養が豊富であることが知られている（例えば、*Hooff and Peterson* 2006, *Mackas et al.* 2007）。一方で、暖水性の動物プランクトンは、一般的にサイズが小さく、栄養に乏しいことが知られている（例えば、*Batten and Walne* 2011）。*Peterson et al.* (2017) は、太平洋北西部の河川から海に移動するサケ科魚類の生存率は、最初に降海するときの脂質の多い餌生物資源の豊富さと正の相関があることを報告している。両海域におけるサケ稚魚胃内容物分析の結果から、主に冷水性の動物プランクトンが見いだされる場合が多い。両海域における沿岸滞泳期におけるサケ稚魚は、栄養が豊富な

冷水性の動物プランクトンの要求が高いものと考えられる。

これらの結果から、枝角類、暖水性カイアシ類のようなプランクトンは、一般的にサイズが小さく、栄養分に乏しいため、春の早い時期からこれらが優占することは、沿岸に滞泳するサケ幼稚魚の成長、生残に好ましくない可能性が考えられる。

【引用文献】

- Batten, S.D., and A.W. Walne. (2011) Variability in northwards extension of warm water copepods in the NE Pacific. *J. Plankton. Res.* 33: 1643-1653.
- Caliński, T., and J. Harabasz. (1974) A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics.* 3: 1-27.
- Dufréne, M., and P. Legendre. (1997) Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecol Monogr.* 67: 345-366.
- Hooff, R.C., and W.T. Peterson. (2006) Copepod biodiversity as an indicator of changes in ocean and climate conditions of the northern California current ecosystem. *Limnol. Oceanogr.* 51: 2607-2620.
- 加賀敏樹・小熊幸子・春日井潔・東屋知範・門谷茂・荒内勉・福若雅章 (2016) 北海道東部根室湾における春季～夏季の動物プランクトンの群集構造の特性および環境要因との関係 沿岸海洋研究 53: 179-191.
- Mackas, D.L., S. Batten, and M. Trudel. (2007). Effects on zooplankton of a warmer ocean: Recent evidence from the Northeast Pacific. *Prog. Oceanogr.* 75: 223-252.
- Peterson, W.T., J.L. Fisher, P. T. Strub, X. Du, C. Risien, J. Peterson, and C. T. Shaw. (2017) The pelagic ecosystem in the Northern California Current off Oregon during the 2014–2016 warm anomalies within the context of the past 20 years. *J. Geophys. Res. Oceans.* 122: 7267-7290.

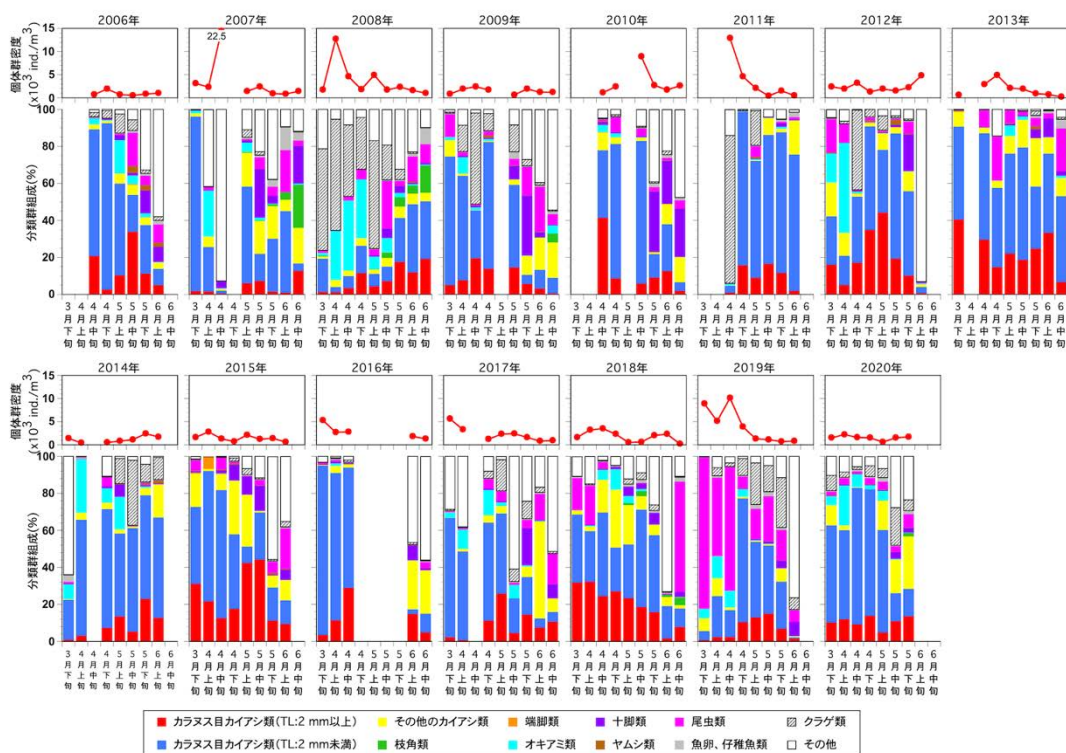


図 1. 厚田沿岸域における 2006～2020 年の動物プランクトン個体群密度と分類群組成 (4 定点の平均値)

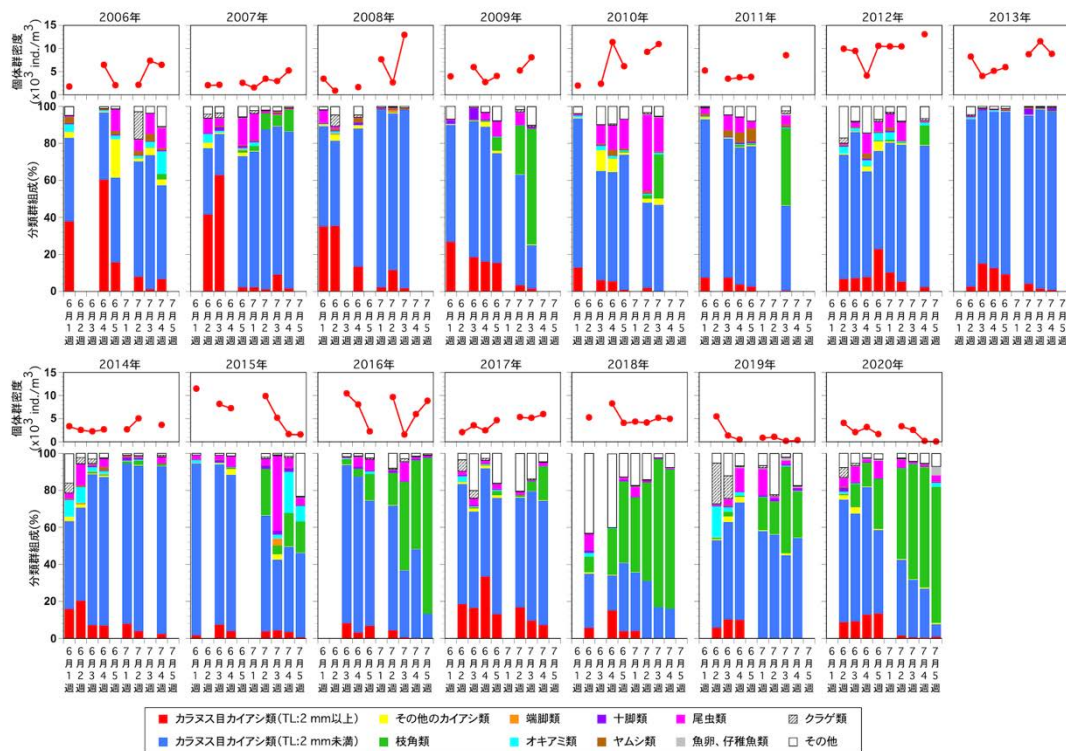


図 2. 昆布森沿岸域における 2006～2020 年の動物プランクトン個体群密度と分類群組成 (4 定点の平均値)

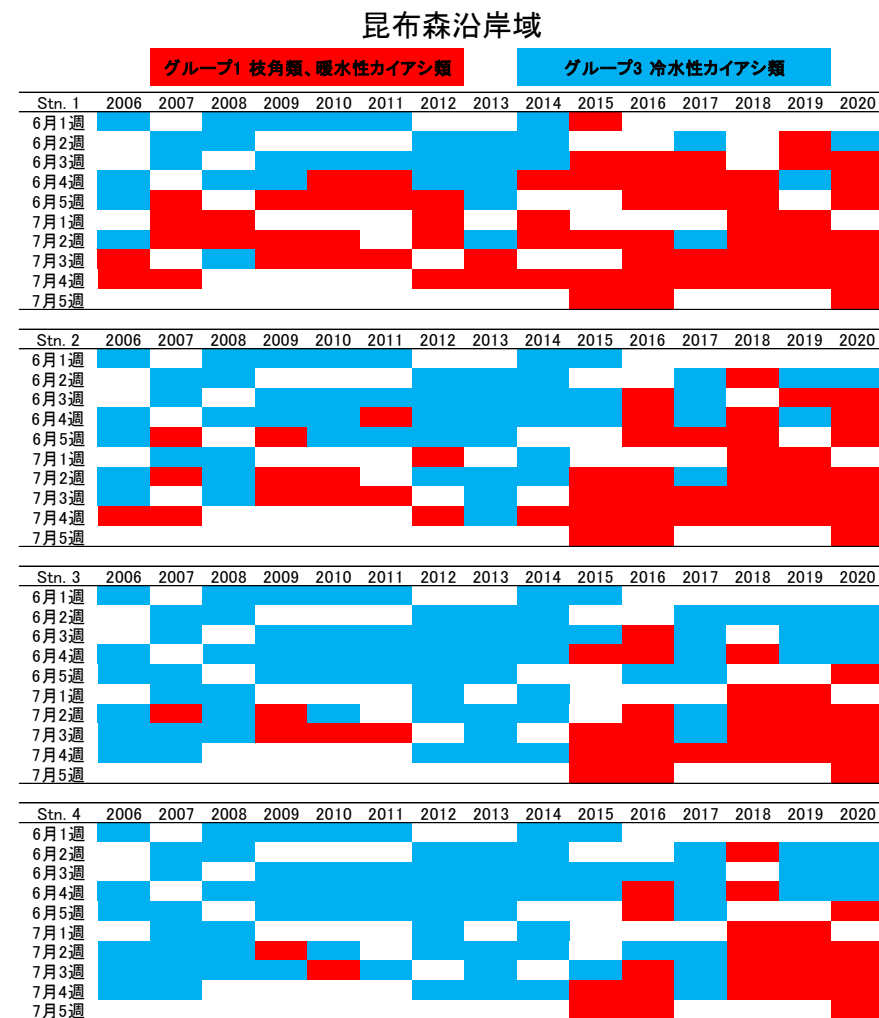
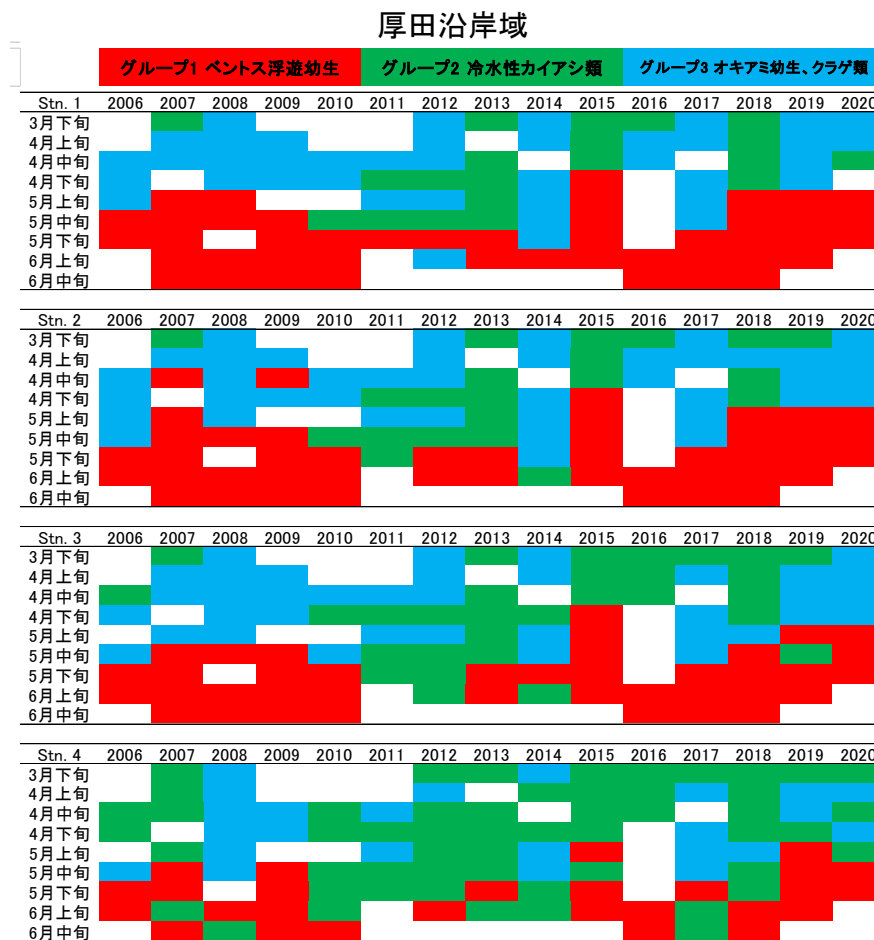


図 3. 厚田および昆布森沿岸域における動物プランクトンの群集構造の年変動および季節変動

表 1. 厚田沿岸域における各グループの個体数密度、積算平均水温、積算平均塩分の平均値、および各グループの指標種

	グループ1 ベントス浮遊幼生 平均値±標準偏差	グループ2 冷水性カイアシ類 平均値±標準偏差	グループ3 オキアミ類幼生、クラゲ類 平均値±標準偏差
個体数密度 (個体/m ³)	1349.8±1110.4	2522±3165.1	2749.1±3916.3
積算平均水温 (°C)	10.8±1.7	7.4±2.1	6.7±1.8
積算平均塩分 (PSU)	33±0.6	32.6±0.7	32.8±0.8

指標種	indval	指標種	indval	指標種	indval
Echinodermata	0.55	<i>Neocalanus</i> spp.	0.44	<i>Obelia</i> spp.	0.61
Fish eggs	0.53	<i>Pseudocalanus minutus</i>	0.44	Euphausiid calyptopis	0.52
Decapoda larva	0.47	<i>Pseudocalanus newmani</i>	0.38	Euphausiid metanauplius	0.49
Gastropoda larva	0.46	<i>Metridia pacifica</i>	0.38	Euphausiid nauplius	0.43
<i>Oikopleura longicauda</i>	0.42			Hydrozoa	0.42
Polychaeta larva	0.38				
<i>Oithona atlantica</i>	0.37				
<i>Tortanus discaudatus</i>	0.36				
<i>Evadne nordmanni</i>	0.33				
<i>Mesocalanus tenuicornis</i>	0.31				

表 2. 昆布森沿岸域における各グループの個体数密度、積算平均水温、積算平均塩分の平均値、および各グループの指標種

	グループ1 枝角類、暖水性カイアシ類 平均値±標準偏差	グループ2 冷水性カイアシ類 平均値±標準偏差
個体数密度 (個体/m ³)	5086.1±5369.9	4558.7±4538.3
積算平均水温 (°C)	9.5±2.2	7.4±1.6
積算平均塩分 (PSU)	31.5±4.9	32.3±0.3

指標種	indval	指標種	indval
<i>Podon leuckarti</i>	0.87	<i>Neocalanus</i> spp.	0.61
<i>Evadne nordmanni</i>	0.77	<i>Acartia tumida</i>	0.60
<i>Centropages abdominalis</i>	0.52	<i>Pseudocalanus newmani</i>	0.58
Balanomorpha nauplius	0.51	<i>Pseudocalanus minutus</i>	0.48
<i>Acartia hudsonica</i>	0.48	Sagitta larva	0.36
<i>Eurytemora herdmanni</i>	0.44	Euphausiid calyptopis	0.31
Gastropoda larva	0.41	<i>Sagitta elegans</i>	0.30
Decapoda larva	0.38		
Fish eggs	0.35		
Balanomorpha cypris	0.32		

g. サケ幼稚魚の地理的起源推定（資源生態部 佐藤俊平）

【目的】

各種調査で採集されるサケ幼稚魚について、耳石温度標識の確認と遺伝分析を行い、その地理的起源を明らかにするとともに、それらの移動時期・経路・魚体サイズなどを把握する。

【方法】

2021 年 5 月中旬－7 月中旬にかけて実施された春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査（以下春定置網調査、室蘭・虎杖浜・厚賀・春立・大樹、図 1）および沿岸幼稚魚モニタリング調査（以下昆布森調査、図 1）において採集されたサケ幼稚魚について、各個体の尾叉長および体重を測定し、頭部より耳石標本を採集した。また同時に尾部等の体組織を採集し、99 %エタノールで固定して遺伝標本とした。採集した耳石標本は標準的な方法で標識の有無を確認し、標識魚については標識パターンから放流されたふ化場を特定した。また、遺伝標本から Puregene DNA Extraction Kit（QIAGEN）を用いて DNA を抽出した。抽出した DNA を 384 ウェルプレートに分注し、既知の SNP（一塩基多型）マーカー 45 遺伝子座を用いて TaqMan 法による遺伝子型の決定をリアルタイム PCR（QuantStudio 7 Flex リアルタイム PCR システム, ThermoFisher Scientific）で行った。得られた遺伝子型データをもとに条件付き最尤法による遺伝的系群識別を行い、採集場所別・尾叉長別（小型魚：10 cm 未満、大型魚：10 cm 以上）で地理的起源を推定した。推定した地理的起源は北海道日本海・北海道オホーツク海/根室海峡、北海道太平洋、本州太平洋、本州日本海の 5 地域である。なお、大型魚の地理的起源の推定は、まとまった採集があった昆布森についてのみ行った。

【結果及び考察】

春定置網調査を実施した 5 地点では、調査期間中に合計 686 個体のサケ稚魚が採集された（表 1）。その内訳は室蘭 20 個体、虎杖浜 259 個体、厚賀 54 個体、春立 266 個体、大樹 87 個体で、虎杖浜および春立における採集が多かった。また大樹で採集された 87 個体のうち 81 個体はマダラ・スケトウダラ・アメマス の胃内容物から採集された個体であり、定置網でタモ網により採集された個体は 6 個体に留まった。採集されたサケ幼稚魚の平均尾叉長±標準偏差は、室蘭が 6.84 ± 0.137 cm、虎杖浜が 7.01 ± 0.91 cm、厚賀が 7.05 ± 0.66 cm、春立が 8.20 ± 0.71 cm、大樹が 8.15 ± 1.41 cm（尾叉長が測定可能だった 53 個体の結果）となり、このうち厚賀と春立では例年よりも平均尾叉長が小さい傾向が見られた（図 2）。尾叉長分布はいずれの地点においても一峰型を示し、そのピークは室蘭・虎杖浜・厚賀では 7 cm 前後、春立・大樹では 8～9 cm 前後であった（図 3）。また尾叉長 10 cm 以上の大型魚はこれらの調査地点ではほとんど採集されなかった。一方、昆布森調査では合計 513 個体のサケ稚魚が採集され（表 1）、その平均尾叉長±標準偏差は 9.09 ± 1.15 cm であった（図 2）。また尾叉長分布は春定置網における結果と同様に一峰型を示し、そのピークは 8～9 cm 前後であった（図 3）。さらに昆布森では尾叉長 10 cm 以上の大型魚が 89 個体採集された。

春定置網調査および昆布森調査で採集されたサケ幼稚魚 1,199 個体のうち、耳石を得られなかった 26 個体を除いた 1,173 個体について耳石温度標識の有無を確認した。その結果、231 個体（19.7 %）で標識が確認され、このうち 186 個体がえりも以西由来、43 個体がえりも以东由来、2 個体が根室由来であった（表 2）。調査地点別に見ると、室蘭・虎杖浜・厚賀・春立ではえりも以西由来の標識魚が優占し、その多くは静内川（静内さけます事業所または豊畑ふ化場）あるいはえりも以西統一コード（日高幌別・敷生・知内）の標識が施された個体であった。また根室由来の 2 個体はいずれも春立で再捕され、その起源は西別川（虹別さけます事業所）であった。大樹および昆布森ではえりも以东由来の標識魚の割合が増加し、その大部分は十勝川（十勝さけます事業所）から放流された個体であった。一方、昆布森では道南地域を起源とする個体が見つかっており、特

に大型魚では遊楽部川(八雲さけます事業所)から放流された個体が再捕された(表 2)。また、例年再捕が見られる本州太平洋および本州日本海のふ化場を起源とする標識魚は、春定網調査と昆布森調査のいずれにおいても、今回は全く確認されなかった。

春定置網調査および昆布森調査で採集されたサケ幼稚魚について、小型魚と大型魚のそれぞれについて遺伝的系群識別により地理的起源を推定し、2016 年以降の結果と比較した。その結果、小型魚では例年と同様に北海道系(日本海地域・オホーツク海/根室地域・太平洋地域)の割合が高く推定され、ほとんどの調査地点で北海道太平洋地域が優占していた(図 4a)。一方、本州系(太平洋地域あるいは日本海地域)の割合は厚賀を除いて非常に低く、特に本州太平洋地域はほとんど推定されなかった。昆布森調査で採集された大型魚について遺伝的系群識別による地理的起源の推定を行ったところ、本州太平洋地域の割合が過去最も低く、逆に本州日本海地域の割合が最も高くなった(図 4b)。

春定置網調査で採集されたサケ幼稚魚の平均尾叉長は、室蘭・虎杖浜では例年と同程度であったが、厚賀・春立では例年よりも小さい傾向を示した。また昨年に引き続き、室蘭から大樹の調査地点では尾叉長 10 cm 以上の大型魚がほとんど採集されなかった。特に厚賀および春立において、採集された個体に占める大型魚の割合は厚賀で 1.9 % (54 個体中 1 個体)、春立で 0.4 % (266 個体中 1 個体)であり、2014 年－2019 年に実施した同様の調査データ(佐藤ほか 2016、2017、2018、2019、2020)から計算した値(厚賀:15.0－57.1 %、春立:10.9－62.0 %)と比較し非常に低かった。大型魚は 2020 年の春立でも確認されておらず(99 個体中 0 個体、0.0 %、佐藤ほか 2021)、少なくとも直近 2 年間では大型のサケ幼稚魚の沿岸への来遊が少なかった可能性がある。

今回の耳石温度標識の分析では、本州太平洋地域を由来とする標識魚は見つからなかった。また遺伝的系群識別結果においても、小型魚・大型魚共に本州太平洋地域の割合は非常に低かった。過去の調査結果から、本州太平洋地域の個体は大型魚として北海道太平洋沿岸に来遊し昆布森まで移動すると推定されていることから(例えば佐藤ほか 2016)、2021 年は本州太平洋地域を由来とするサケ幼稚魚が、少なくとも調査期間中に北海道太平洋沿岸や昆布森までたどり着けていない可能性を示唆している。一方、本州日本海地域を由来とするサケ幼稚魚は、標識魚では見つからなかったものの、昆布森サケ大型魚の遺伝的系群識別では過去最も高い割合を示した。このような耳石標識と遺伝的系群識別による推定の間における結果の齟齬は過去にも見られているが(佐藤ほか 2019)、その理由として遺伝分析における解像度(どれだけ精度良く系群推定ができるか)が影響している可能性がある。今後も同様のモニタリング調査を継続する場合には、用いる遺伝マーカー数の増加等による解像度の向上を図るとともに、耳石標識分析と遺伝分析を併用して得られた結果を総合的に判断する必要がある。

【引用文献】

- 佐藤俊平ほか. (2016)(1-6) 耳石標識と遺伝分析によるサケ稚魚の移動動態の解明. 平成 27 年度太平洋サケ資源回復調査委託事業 調査報告書. 47-55.
- 佐藤俊平ほか. (2017)(3) 耳石標識と遺伝分析によるサケ稚魚移動動態の解明. 平成 28 年度サケ資源回帰率向上調査事業 調査報告書. 95-101.
- 佐藤俊平ほか. (2018)(3) 耳石標識と遺伝分析によるサケ稚魚移動動態の解明. 平成 29 年度サケ資源回帰率向上調査事業 調査報告書. 96-102.
- 佐藤俊平ほか. (2019) (3)-1-3 サケ幼稚魚の地理的起源推定. 平成 30 年度さけ・ますふ化放流抜本対策事業 調査報告書. 61-65.
- 佐藤俊平ほか. (2020) (3)-1-3 【サケ幼稚魚の地理的起源推定】 令和元年度さけ・ます等栽培対象資源対策事業 さけ・ますふ化放流抜本対策 調査報告書. 52-53.
- 佐藤俊平ほか. (2021) (3)-1-3 【サケ幼稚魚の地理的起源推定】 令和 2 年度さけ・ますふ化放流抜本対策事業 調査報告書. 53-54.

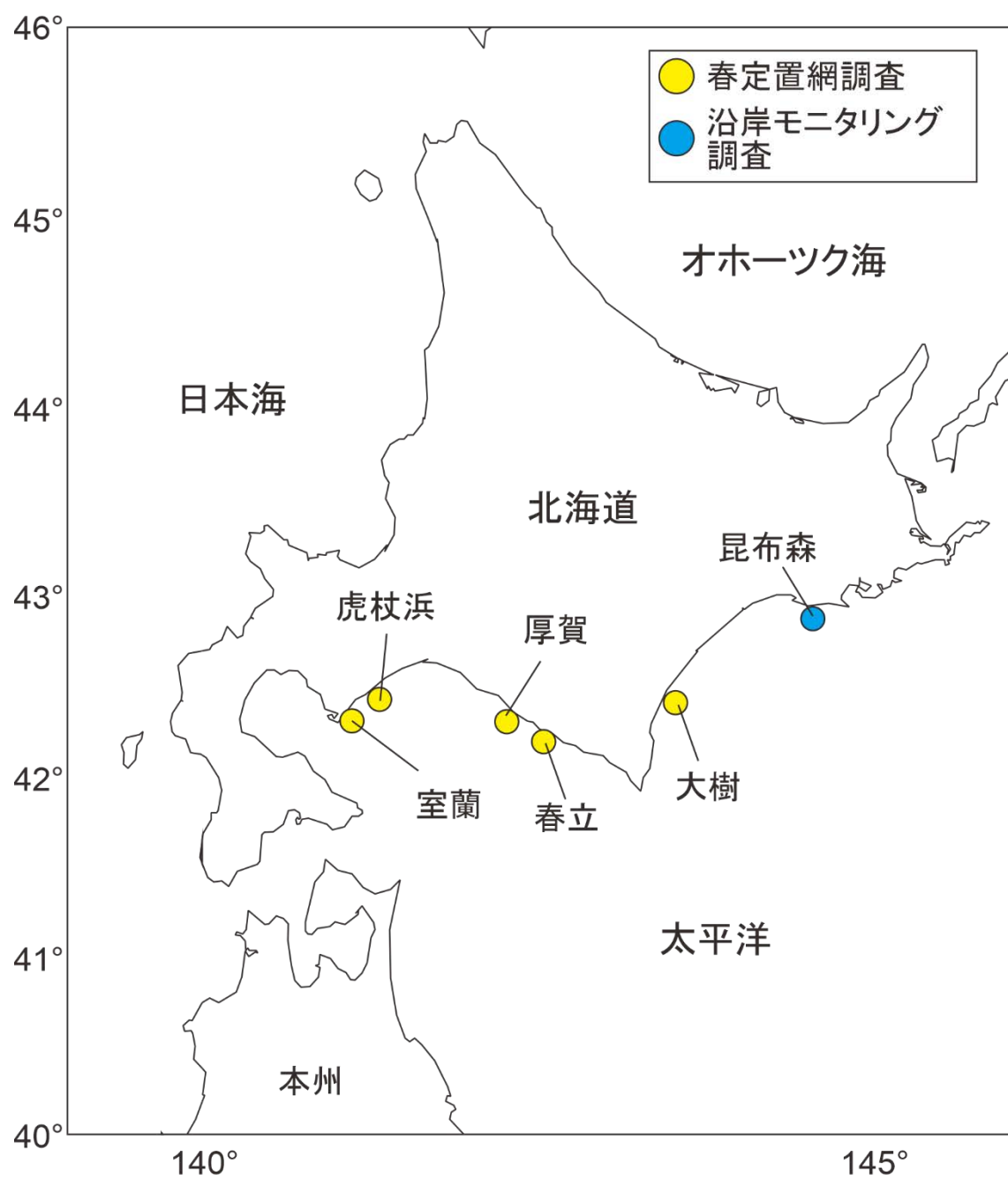


図 1. 2021 年 5 月－7 月にサケ幼稚魚を採集した春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査および沿岸サケ幼稚魚モニタリング調査の調査定点

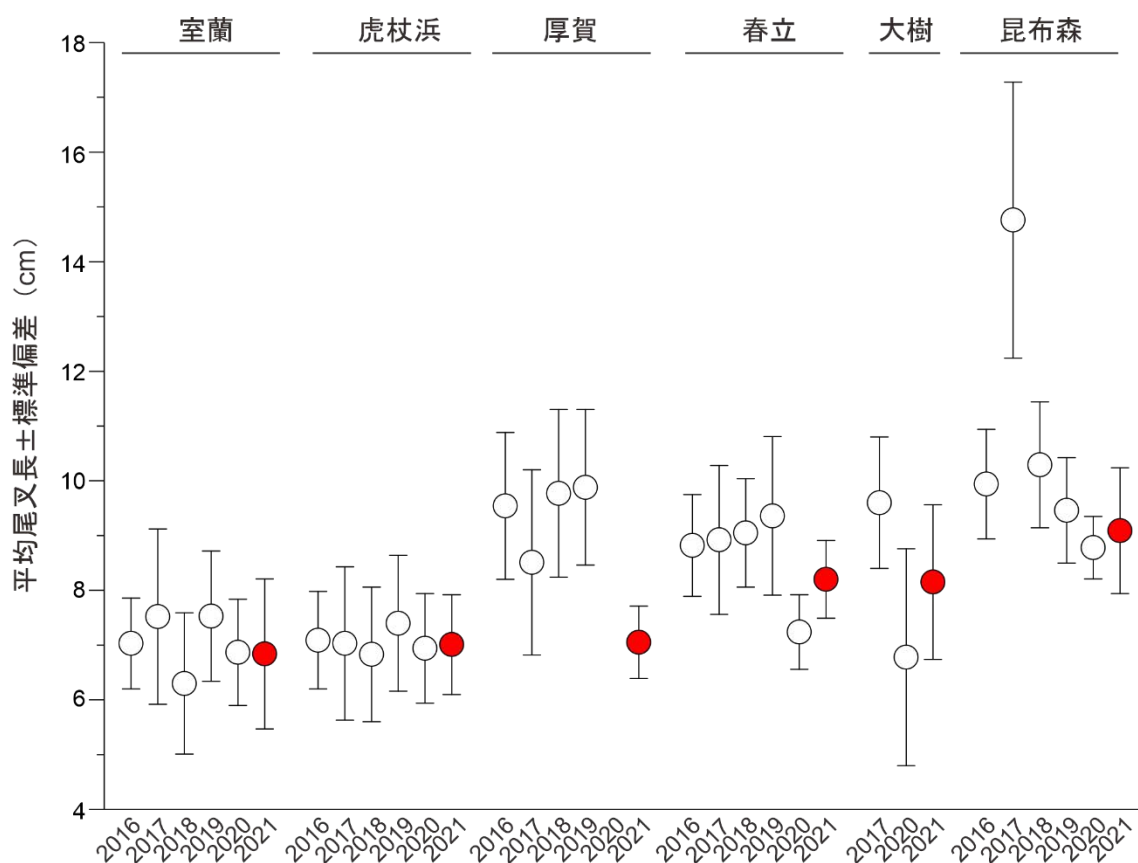


図 2. 2016－2021 年の春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査および沿岸サケ幼稚魚モニタリング調査で採集されたサケ幼稚魚の平均尾叉長と標準偏差 赤丸で示したグラフは 2021 年の結果を示す。厚賀の 2020 年は採集なし。

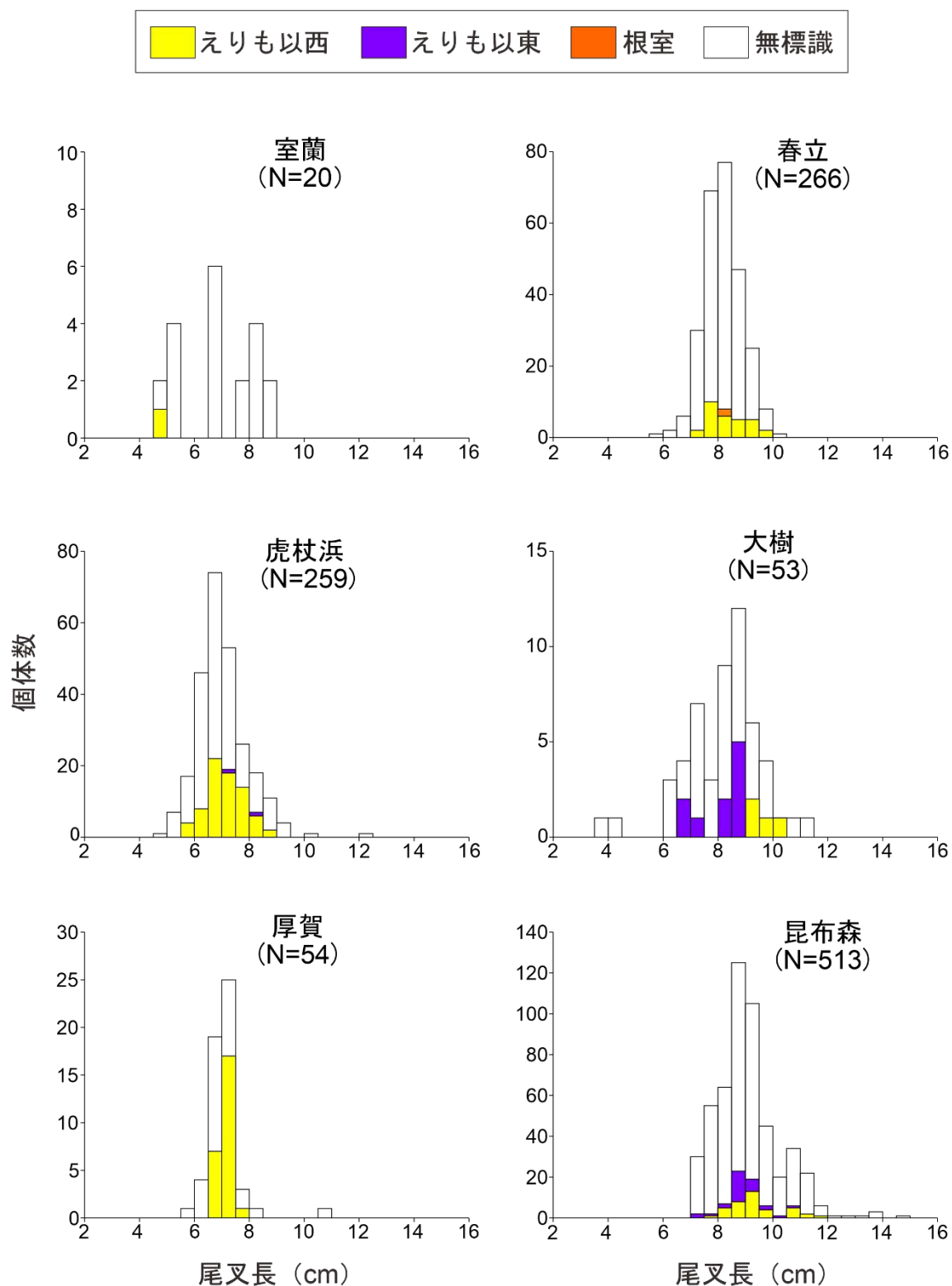


図 3. 2020 年に春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査および沿岸サケ幼稚魚モニタリング調査で採集されたサケ幼稚魚と耳石温度標識魚の尾叉長分布 大樹は尾叉長の計測が可能だった個体のみを使用。

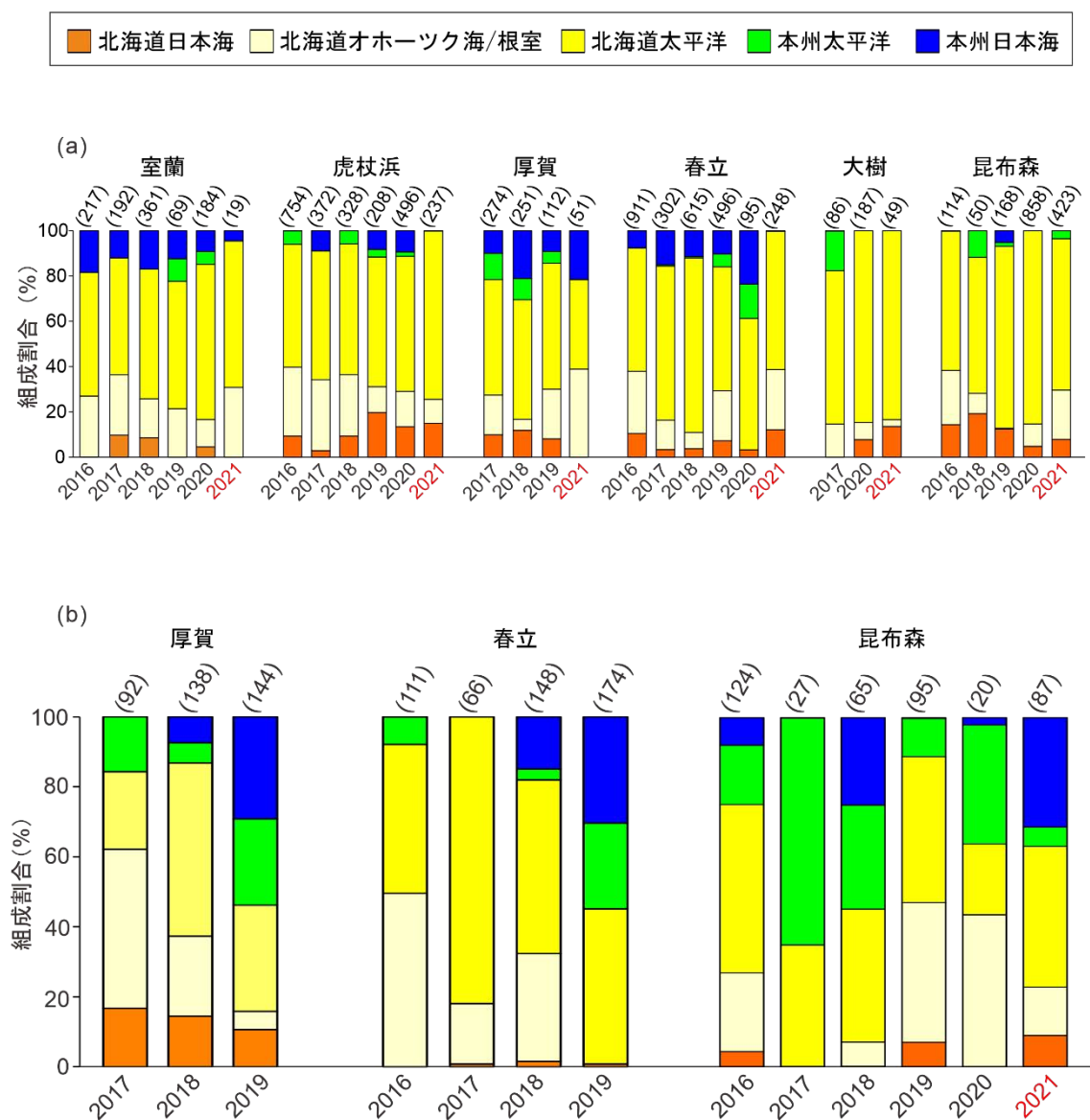


図 4. 遺伝的系群識別により推定した、2016－2021 年の春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査および沿岸サケ幼稚魚モニタリング調査で採集されたサケ幼稚魚の地理的起源 (a) 小型魚 (尾叉長 10 cm 未満)、(b) 大型魚 (尾叉長 10 cm 以上)。グラフ上部の数字は分析個体数を示す。

表 1. 2021 年に北海道太平洋沿岸の春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査および沿岸幼稚魚モニタリング調査で採集されたサケ幼稚魚の時期別採集尾数
－は調査が実施されなかったことを示す。

	室蘭	虎杖浜	厚賀	春立	大樹	昆布森	合計
調査期間	5/18-6/10	5/22-6/17	5/28-6/21	5/27-7/1	6/2-6/29	6/8-7/30	
5 月中旬	10	-	-	-	-	-	10
5 月下旬	-	206	54	0	-	-	260
6 月上旬	10	37	-	1	3	1	52
6 月中旬	-	16	-	39	31	8	94
6 月下旬	-	-	0	226	53	355	634
7 月上旬	-	-	-	0	-	75	75
7 月中旬	-	-	-	-	-	74	74
7 月下旬	-	-	-	-	-	0	0
合計	20	259	54	266	87*	513	1199

*87 個体中 81 個体はマダラ・スケトウダラおよびアメマス の胃内容物から採集された。

表 2. 2021 年に春定置網混入サケ稚魚モニタリング調査および沿岸幼稚魚モニタリング調査で採集されたサケ幼稚魚から見つかった尾叉長別の耳石温度標識魚の個体数とその放流起源 小型魚：尾叉長 10 cm 未満、大型魚：尾叉長 10 cm 以上。

放流起源	室蘭		虎杖浜		厚賀		春立		大樹		FL 不明	昆布森	
	小型魚	大型魚	小型魚	大型魚	小型魚	大型魚	小型魚	大型魚	小型魚	大型魚		小型魚	大型魚
北海道えりも以西													
知内	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
八雲	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	9
静内	0	0	37	0	1	0	8	0	1	0	1	16	4
豊畑	1	0	16	0	1	0	3	0	2	1	1	3	4
日高幌別・敷生・知内	1	0	21	0	23	0	18	0	0	0	0	11	0
北海道えりも以東													
十勝	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0	1	26	2
更別第 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
鶴居	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
根室													
虹別	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
耳石無し	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	20	0	0
無標識魚	18	0	181	2	28	1	233	1	31	2	11	364	70